

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.014

# 基于图论的韩江流域水库群生态调度

李泽君<sup>1,2,3,4</sup>, 赵璧奎<sup>1,2,3,4</sup>, 黄本胜<sup>1,2,3,4</sup>, 邱静<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635; 3. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

**摘要:**采用水文学方法计算了韩江流域干支流重要控制断面的生态流量目标;基于图论原理,根据流域内干支流水系特征、重要水利工程和控制断面分布情况构建了韩江流域河网图模型;考虑河段区间来水、河道外取水、引调水等边界条件以及流域水库群水量调蓄作用,开展了河网水量平衡计算,确定了河网节点流量。通过计算水库坝址所在断面的天然生态基流,提出了耦合最小生态下泄流量要求的水库常规调度规则;借鉴大系统聚合-分解思想,提出了韩江流域河网图模型迭代优化求解思路;通过选取不同典型年来水过程,评估了常规调度情况下控制断面生态流量保障程度,并在此基础上进行优化调度,分析流域水库群生态调度保障潜力。结果显示,耦合最小生态下泄流量要求的水库常规调度规则能够让水库在独立运行的情况下,基本保障不同来水条件下的控制断面生态流量需求;韩江流域水库群通过开展联合优化调度满足控制断面生态流量需求;基于图论方法开展流域水库群生态调度具有可行性和实用性。

**关键词:**生态流量;水库群联合调度;图论;韩江流域

**中图分类号:**TV697.1<sup>+</sup>2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2023)02-0109-09

**Multi-reservoir ecological operation based on graph theory in the Hanjiang River Basin** // LI Zejun<sup>1,2,3,4</sup>, ZHAO Bikui<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Bensheng<sup>1,2,3,4</sup>, QIU Jing<sup>1,2,3,4</sup> (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Estuary Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Application Research, Guangzhou 510635, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** The objective ecological flows in vital controlled sections in main stream and tributaries of the Hanjiang River Basin are calculated with hydrological methods. Based on graph theory, the river network graph model of the Hanjiang River Basin was constructed according to the characteristics of the river system, the distribution of important water conservancy projects and control sections. Flow at each node of the river network was determined by carrying out water balance calculation of river network, which takes interval flow, water intake and water diversion as well as water regulation effect of multi-reservoir system into account. By calculating the natural ecological base flow of the sections where reservoir dams are sited, the conventional reservoir operation rules coupling the requirements of minimum ecological discharge are put forward. Referring to the idea of aggregation and decomposition of a large-scale system, the idea of iterative optimization of river network model of the Hanjiang River Basin is put forward. The secured ecological flow level under conventional regulation is evaluated with the flow processes in typical years. On this basis, optimal operations are conducted and the potential of secured ecological operation on multi-reservoir in the basin. The results show that reservoir conventional operation scheme coupled with the minimum discharge requirements can basically secure the ecological flow demand at the control sections with various flow processes, under the condition of independent operation in reservoirs. Reservoirs in the Hanjiang River Basin can meet the ecological flow demand at the control sections through optimal joint operation. Carrying out multi-reservoir ecological operation based on graph theory is feasible and practical.

**Key words:** ecological flow; multi-reservoir joint operation; graph theory; Hanjiang River Basin

河流生态流量是指能够维持河流生态系统健康,满足人类生存发展所需要的流量<sup>[1]</sup>。联合国在2015年通过的《2030年可持续发展议程》中,将实施生态流量作为实现可持续发展目标的重要措施之一<sup>[2]</sup>。针对生态流量的研究最早开始于20世纪40年代,经过多年的探索与实践,河流生态流量保障已逐渐成为国内外水资源调度与管理的重要内容之一<sup>[3-6]</sup>。探索水库生态调度机制、保障河湖生态流量事关我国生态文明建设和水利改革发展全局,对于强化水利行业监管、维护流域水安全具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

水库生态调度是协调流域人-水系统不断循环演进背景下人与自然用水矛盾的水库调度方式<sup>[9]</sup>。人类一方面通过修建水利工程调节丰枯水量而改变了天然水文情势,另一方面在社会生产活动中高强度取水又挤占了河道内生态环境用水,因此,开展流域水库生态调度目的不仅在于降低水库调蓄作用对自然水文过程的干扰,同时也需要合理协调河道内外用水需求。近年来已有较多学者开展了水库生态调度方面的研究<sup>[10-14]</sup>,但大多单独将参与调度的水库和下游生态保障对象抽象出来,而流域尺度生态调度模型的构建,需要在考虑调度对象和生态保障对象的同时,综合考虑在流域空间尺度上所发生的人类活动对水量传递转化过程的干扰作用<sup>[15]</sup>。

图论通常被应用于描述水系连通,通过点、线和计算单元之间的拓扑连接形成有向图,从而描述流域水系网络中的水量传递转化过程<sup>[16-19]</sup>。为了全面考虑发生在流域内不同时间和空间尺度上的天然来水和人工影响过程,本文采用图论基本方法构建了韩江流域水库群生态调度模型,在依据水系和水利工程拓扑结构构建流域河网图模型的基础上,耦合区间来水、河道外取水、引调水等边界条件,考虑流域水库群调度和各节点水量平衡关系,提出了面向生态流量保障的流域河网图模型优化求解方法,探究流域水库群生态调度保障潜力。

## 1 研究区概况

韩江流域位于粤东、闽西南地区(图1),跨越江西、福建、广东3省,在东经115°13'~117°09'、北纬23°17'~26°05'之间,流域面积30 112 km<sup>2</sup>。韩江流域雨量充沛,多年平均降水量在1 600 mm左右,但年内分配不均匀,其中汛期4—9月降水量占全年降水量的80%左右。由于天然来水丰枯差异显著,社会经济的快速发展引发河道外用水需求快速上升,导致韩江流域枯水期长期面临较为严重的河道内外用水矛盾<sup>[20]</sup>。

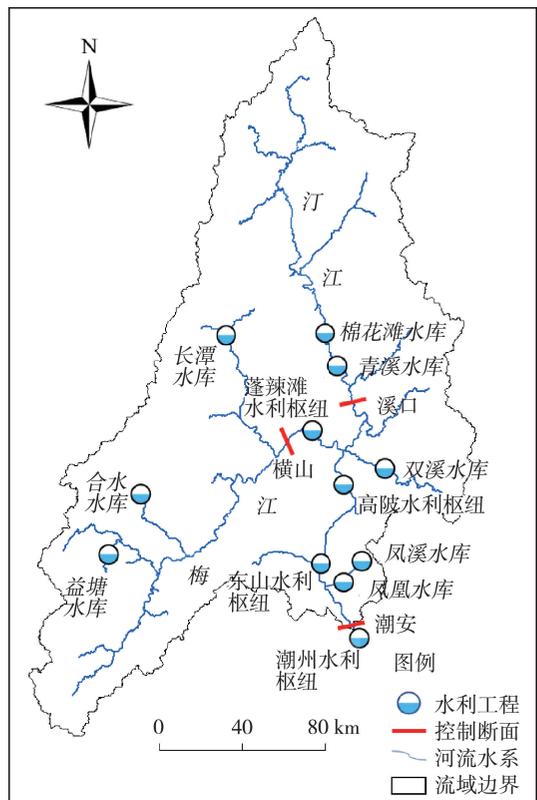


图1 韩江流域主要水库及控制断面

Fig. 1 Main reservoirs and control sections in the Hanjiang River Basin

韩江流域有梅江和汀江两大支流,两支流上各设有控制性水文站,分别为横山站和溪口站,潮安站为韩江下游干流上的控制性水文站,选取这3个水文站所在断面作为生态流量控制断面。

根据韩江流域水库调度能力和实际调度情况,共选取12座水库作为韩江流域主要调度水库,包括棉花滩、益塘、合水和长潭4座大型水库,蓬辣滩、高陂、东山、潮州4座水利枢纽,青溪、双溪、凤溪、凤凰4座中型水库。其中,棉花滩、益塘、合水和长潭4座大型水库是流域内的主要调度水库;中型水库中,青溪水库主要发挥对棉花滩下泄流量的反调节作用,双溪水库是支流梅潭河上的重要调节水库,凤凰、凤溪水库位于支流凤凰溪上,是潮安控制断面上游最近的中型水库。

韩江流域共有韩江-榕江-练江水系连通工程(以下简称“三江连通工程”)、揭阳引韩工程、潮阳引韩工程、南澳引韩工程、引韩济饶工程5个跨区域引调水工程。

## 2 生态流量目标的确定

由于现阶段缺少对韩江流域敏感期生态流量的相关研究,因此本文生态流量目标选为生态基流。生态基流的确定主要采用水文学方法。

基于潮安站、溪口站、横山站 3 个水文站 1956—2016 年逐月天然径流系列数据,采用  $Q_p$  法与 Tennant 法<sup>[21]</sup>计算生态基流。

根据  $Q_p$  法与 Tennant 法计算结果,选定两种方法计算结果的外包值作为控制断面生态基流目标,计算结果见表 1。

表 1 主要控制断面生态基流 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$

Table 1 The ecological base flow at main control sections unit:  $\text{m}^3/\text{s}$

断面	所在河流	$Q_p$ 法计算值	Tennant 法计算值	生态基流
潮安	韩江	82	128	128
横山	梅江	57	34	57
溪口	汀江	44	29	44

### 3 水库群生态调度模型

#### 3.1 基本方法

a. 利用图论中的图模型概念<sup>[22]</sup>,在考虑天然水系拓扑结构和水利工程分布的基础上,采用节点和有向线段描述流域水系连通状况。

b. 针对节点与河段关系,分类设定节点属性,描述水量的输入、调蓄、汇流、分流、输出等过程特征。

c. 根据水库、枢纽、水闸等水利工程基本参数和调度运行规则,构建所在节点的水量调度模型,节点输出为水库调度后的流量。

d. 综合考虑河段上游来水、区间来水、河道外取水、引调水等流量过程,构建河段水量平衡模型,输出为河段下游节点流量。

e. 组合构建流域河网图模型,从而实现水量自上游至下游的传递转化过程的模拟。

f. 基于历史典型年来流数据,评估水库常规调度规则下生态流量保障程度。

g. 根据常规调度情景下断面生态流量缺口情况,提出基于流域河网图模型结构的优化求解方法,并设计水库群联合优化调度方案。

#### 3.2 流域河网图模型的构建

流域河网图模型是由节点与有向线段组成的有向图。定义一个流域河网图模型  $G = (V, E)$ ,其中  $V$  为节点集合,  $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ ,  $N$  为节点数;  $E$  为有向线段集合,  $E = \{e_j | j = 1, 2, \dots, M\}$ ,  $M$  为线段数。图模型结构可通过邻接矩阵  $A$  表示,对于一个  $N \times N$  的矩阵,若元素  $a_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, N)$  等于 1,代表水量由节点  $v_i$  流向节点  $v_j$ 。通过节点与有向线段基本属性和功能的设定,可实现对流域水量传递转化过程的定量描述。

模型节点根据功能划分为非工程节点和工程节点两类,节点的定义、与河段关联情况以及在水量传递和优化求解中所需实现的功能见表 2 和图 2。

河段由有向线段表示,对于由节点  $u$  指向节点  $v$  的有向线段,可用唯一向量  $(u, v)$  表示,代表水量由节点  $u$  流向节点  $v$ 。为了反映河道水量在天然来水和人工干涉相互影响下的动态演进过程,本文在河段的输入、输出节点基础上,添加了区间来水、河道外取水、引调水、水库工程等多个要素。

设河段上游来水流量为  $q_1$ , 区间来水流量为  $q_2$ , 河道外取水流量为  $q_3$ , 引调水工程取水流量为  $q_4$ , 则可计算得到水库入库流量  $q_5$  (式(1)); 水库调度模块根据水库基本参数和调度规则,对入库流量进行调蓄,得到下泄流量  $q'_5$  (式(2))。

$$q_5 = q_1 + q_2 - q_3 - q_4 \quad (1)$$

$$q'_5 = f(q_5) \quad (2)$$

式中  $f(q_5)$  为水库调度函数。

在河网图模型中,水量自上游至下游逐河段演算,最终至输出节点,计算结束。为了反映主要控制断面生态流量满足情况,在控制断面所在位置设置过渡节点,过渡节点不改变水量,仅设置指标评价功能。在优化调度中,若控制断面生态流量存在不达标现象,则过渡节点统计不达标时段和缺水量,并由过渡节点开始逐河段向上游传递用水需求。对于分

表 2 河流节点基本情况

Table 2 Basic information of river nodes

节点类型	定义	与河段 关联特征	节点功能	
			模拟过程	优化过程
输入节点	河网上游边界节点	一对一	输入水量	
汇流节点	多个河段共享的同一个下游节点	多对一	将上游多个河段来水量叠加	将下游用水需求分解传递至上游不同河段
分流节点	多个河段共享的同一个上游节点	一对多	将水量分解至下游多个河段	将下游多个河段用水需求叠加至上游河段
输出节点	河网下游边界节点	一对一	输出水量	
过渡节点	上下游仅各连接一条河段的节点		传递水量	
水量调蓄节点	水库、枢纽、水闸等水利工程所在节点		实现水利工程水量调蓄功能	

注:水量调蓄节点为工程节点,其他为非工程节点。

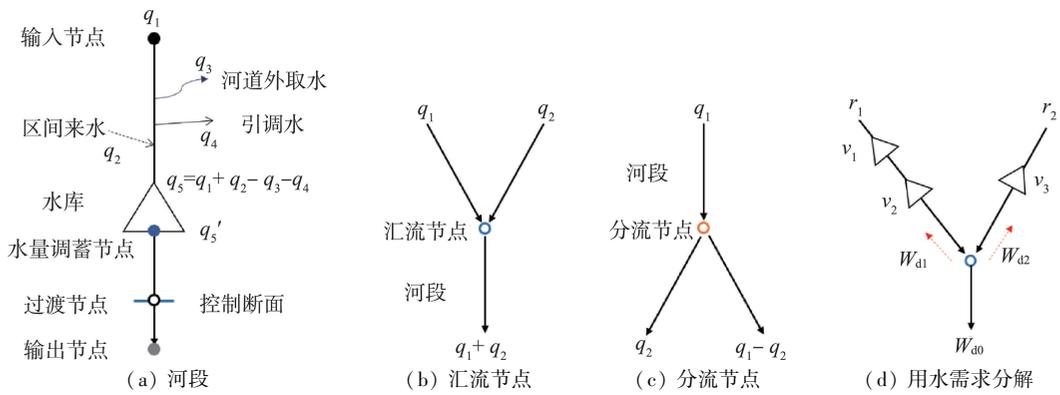


图2 河段与节点基本功能

Fig. 2 Basic functions of the river nodes and edges

流节点,不同河段用水需求直接叠加,而对于汇流节点,由于上游连接多个河段,需要按照一定的规则对用水需求进行分配。借鉴聚合-分解思想<sup>[23-26]</sup>,通过遍历统计汇流节点上游各河段水库可利用水量,将用水需求等比例分解至对应河段。如图2(d)所示,假设汇流节点上游连接2个河段 $r_1$ 与 $r_2$ ,其中河段 $r_1$ 上有两座水库, $t$ 时段水库可利用水量分别为 $W_1$ 与 $W_2$ ;河段 $r_2$ 上有一座水库, $t$ 时段水库可利用水量为 $W_3$ 。若 $t$ 时段下游河段用水需求为 $W_{d0}$ ,则河段 $r_1$ 与 $r_2$ 的用水需求分解可按下式计算:

$$\begin{cases} W_{d1} = \frac{(W_1 + W_2) W_{d0}}{W_1 + W_2 + W_3} \\ W_{d2} = \frac{W_3 W_{d0}}{W_1 + W_2 + W_3} \end{cases} \quad (3)$$

根据韩江流域河网特征、水利工程与重要控制断面分布情况,最终概化形成了由42个节点、41个河段、12个水库工程、3个控制断面、10个概化河道外取水工程、5个跨流域引调水工程等共同组成的韩江流域河网图模型,如图3所示。

### 3.3 水库群调度模拟方案

韩江流域生态调度模型以流域内的主要大中型水库和水利枢纽为调度对象,通过开展水量联合调度,在保障河道外用水和引调水需求基础上,满足潮安、横山和溪口3个控制断面最小生态流量。

考虑到实际调度中开展水库群联合调度的难度,本文提出耦合最小生态下泄流量要求的水库常规调度机制。针对流域控制断面生态流量保障目标,基于断面上游水库的天然来水条件和水量调蓄

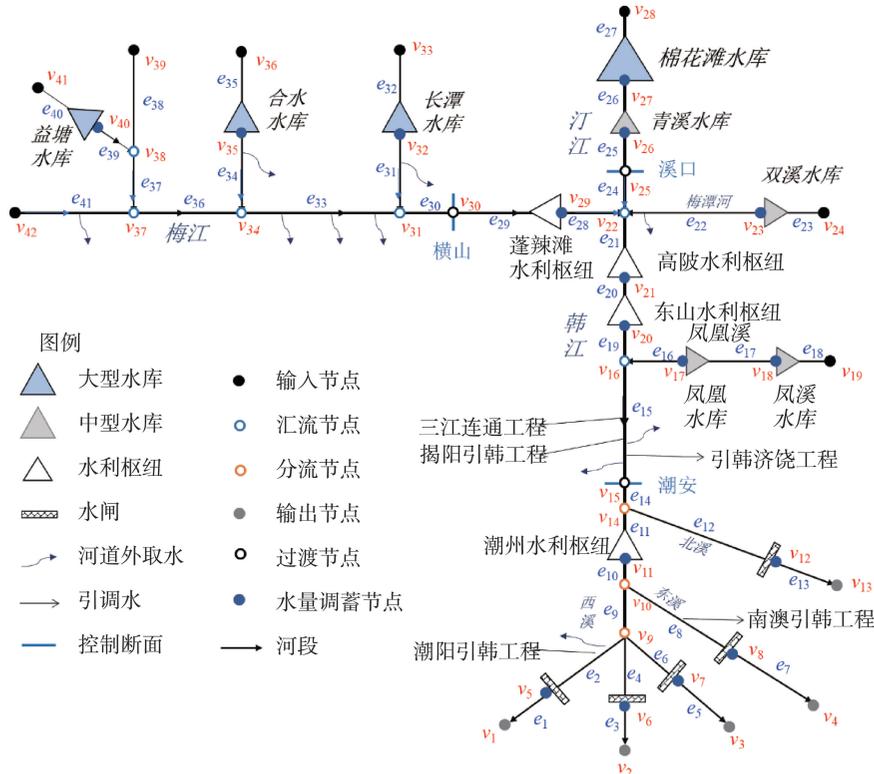


图3 韩江流域河网图模型

Fig. 3 The river network graph model of the Hanjiang River Basin

能力,计算水库坝址所在断面的天然生态基流,提出水库最小生态下泄流量要求,从而实现水库在按照自身调度规则运行基础上即可最大程度保障下游断面生态流量需求。

水库群联合优化调度则是在来水条件不利时期,通过水库常规调度已无法保障下游河道外用水和河道内生态需水的情况下,通过优化求解,加大上游水库下泄流量,保障下游用水需求。

为了评估两种调度规则对3个控制断面生态流量的保障情况,采用韩江流域平水年( $P=50\%$ )、偏枯年( $P=75\%$ )、枯水年( $P=90\%$ )、特枯年( $P=95\%$ )4个典型年条件下的天然径流过程,基于流域河网图模型进行水量调节计算,从而探究流域水库群生态调度保障潜力。

### 3.3.1 常规调度模拟

水库群常规调度模拟是根据水库现状调度规则和最小生态下泄流量要求进行水量调节计算,在流域河网图模型的基础上采用供需动态平衡模拟方法,利用图论的遍历算法进行河网水量汇流和水库群联合调度计算,得到水库群常规调度状态下流域内各河段、节点、水库的流量过程。根据常规调度模拟结果评价不同来水频率下控制断面的生态流量保障情况。

本文水库最小生态下泄流量是指为减轻水利工程对下游河道生态环境的影响,维持河流接近自然状态的水文特征,而要求水利工程在运行期间保持下泄的最小流量<sup>[27-28]</sup>。考虑到蓬辣滩水利枢纽、东山水利枢纽和青溪水库调节库容较小,因此不对其提出最小生态下泄流量要求。潮州水利枢纽由于位于潮安断面下游,不纳入计算。

采用 $Q_p$ 法计算90%来水频率条件下的水库最枯月均入库流量,作为水库最小生态下泄流量,其中棉花滩、益塘、合水、长潭4座大型水库最小生态下泄流量分别为 $55.0\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.9\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.3\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $15.1\text{ m}^3/\text{s}$ ;双溪、凤溪、凤凰3座中型水库最小生态下泄流量分别为 $8.2\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.3\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.2\text{ m}^3/\text{s}$ ;高陂水利枢纽最小生态下泄流量为 $117\text{ m}^3/\text{s}$ 。

### 3.3.2 水库群联合优化调度模拟

水库群优化调度是根据常规调度情景下的控制断面流量过程,分析生态流量的破坏情况,结合调度期水库蓄水量变化过程,在综合各种约束条件的情况下,优化水库下泄流量过程,在控制生态流量最大破坏深度的基础上,提高生态流量保证率。

**a. 目标函数。**以生态流量保证率 $R$ 最大为目标,耦合最大破坏深度 $D$ 约束,构建水库优化调度

目标函数。目标函数可表示为

$$f = \max\{R\} = \max\left\{\frac{\sum_{t=1}^T Z_t}{T}\right\} \leq D \quad (4)$$

$$D = \max\left\{1 - \frac{Q_t}{Q_m}\right\} \quad (Q_t < Q_m) \quad (5)$$

式中: $T$ 为调度时段总数; $Q_t$ 为 $t$ 时刻断面流量; $Q_m$ 为生态流量目标; $Z_t$ 为二进制变量。当 $Q_t > Q_m$ 时, $Z_t = 1$ ;否则 $Z_t = 0$ 。

**b. 约束条件。**包括水量平衡约束、库容约束、流量约束、水位-库容曲线约束:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} + (Q_{L,j,t} - Q_{R,j,t})\Delta t \quad (6)$$

$$W_{j,\min} \leq W_{j,t} \leq W_{j,\max} \quad (7)$$

$$Q_{R,j,\min} \leq Q_{R,j,t} \leq Q_{R,j,\max} \quad (8)$$

$$Z_{j,t} = f(W_{j,t}) \quad (9)$$

式中: $W_{j,t}$ 、 $W_{j,t+1}$ 分别为水库 $j$ 在时段 $t$ 的始、末蓄水量; $Q_{L,j,t}$ 、 $Q_{R,j,t}$ 分别为水库 $j$ 在时段 $t$ 的入库、出库流量; $W_{j,\min}$ 、 $W_{j,\max}$ 分别为水库 $j$ 的库容下限、上限值; $Q_{R,j,\min}$ 、 $Q_{R,j,\max}$ 分别为水库 $j$ 的最小生态下泄流量和最大下泄能力约束; $Z_{j,t}$ 为水库 $j$ 在时段 $t$ 的水位; $f(W_{j,t})$ 表示水库水位与库容关系。

**c. 优化求解方法。**采用图论中树的遍历算法和递归算法来实现树状流域上节点的搜索和水量分配求解,通过分析常规调度控制断面生态流量破坏情况和断面上游水库蓄水情况,自适应迭代优化水库下泄流量,以提高断面生态流量保证率。优化求解流程步骤如图4所示。

## 4 结果与分析

### 4.1 水库群常规调度

表3列出了不同典型年来水条件下,水库常规调度和优化调度结果,并加入了天然径流统计结果进行对比。可以看出,在天然来水条件下,溪口断面生态流量保证率最高,在特枯年也可达96%,但最大破坏深度仍高于20%;潮安断面仅在特枯年会出现较为明显的生态流量破坏现象,生态流量保证率86%,最大破坏深度达42%;而横山断面在偏枯年就开始出现一定的生态流量破坏现象,是3个断面中生态流量破坏现象最严重的断面。通过开展耦合最小生态下泄流量要求的水库群常规调度模拟,可以有效提高溪口和潮安断面生态流量保障程度,其中潮安断面生态流量保证率由86%提高至97%,而最大破坏深度由42%下降至25%。然而,横山断面在常规调度条件下仍面临较为严重的生态流量破坏现象,特枯年破坏时长近2月,最大破坏深度高达50%。

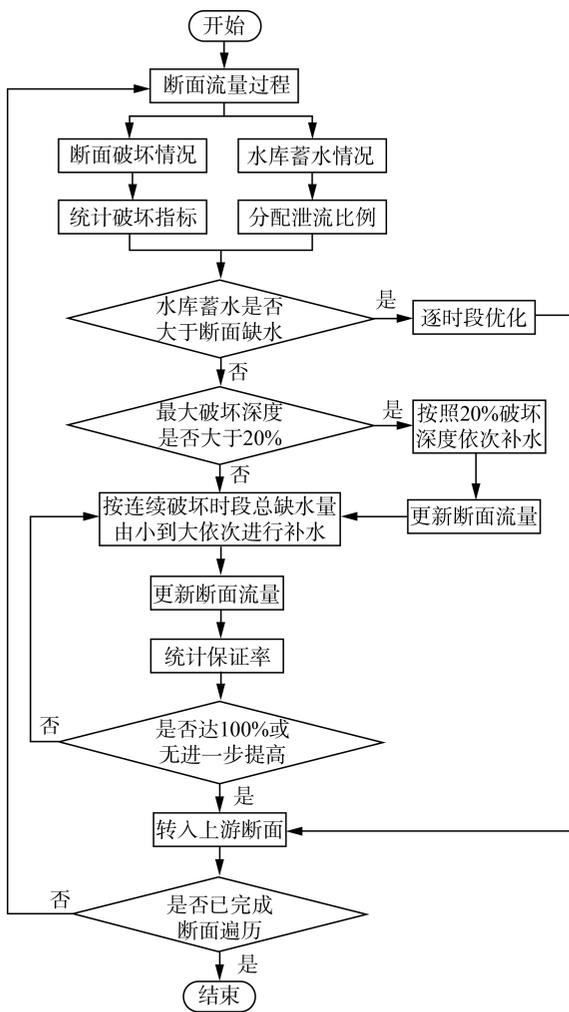


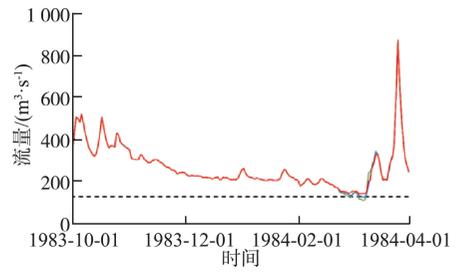
图4 优化求解流程

Fig. 4 The flow chart of the optimization method

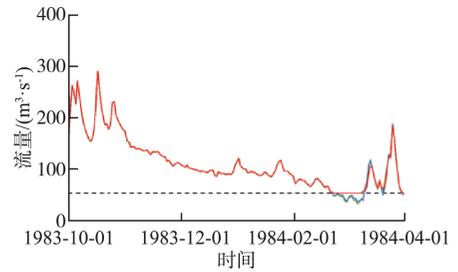
#### 4.2 水库群优化调度

韩江流域水库群联合优化调度结果显示,在不同典型年来水条件下,横山、溪口、潮安断面生态流量保证率均可提高至100%(表3),图5和图6以枯水年和特枯年为例展示了天然流量过程和水库调度

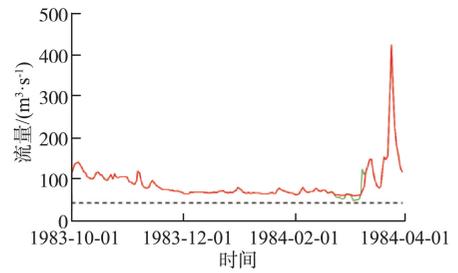
----目标流量 ———天然流量 ———常规调度 ———优化调度



(a) 潮安断面



(b) 横山断面



(c) 溪口断面

图5 枯水年控制断面流量过程

Fig. 5 The flow process at control sections in the typical dry years

效果,说明韩江流域水库群具备保障各控制断面生态流量的潜力。尽管在枯水年和特枯年横山和潮安断面均存在生态流量破坏现象,但通过合理优化益塘、合水、长潭3座大型水库的下泄流量,可以在保

表3 不同典型年水库调度结果

Table 3 Reservoir operation results in the typical years

典型年	断面	保证率/%			最大破坏深度/%			总缺水/万 m <sup>3</sup>		
		天然径流	常规调度	优化调度	天然径流	常规调度	优化调度	天然径流	常规调度	优化调度
平水年	横山	99	99	100	31	28	0	226	215	0
	溪口	100	100	100	0	0	0	0	0	0
	潮安	100	100	100	0	0	0	0	0	0
偏枯年	横山	86	87	100	35	28	0	1 971	1 526	0
	溪口	100	100	100	0	0	0	0	0	0
	潮安	99	100	100	0	0	0	5	0	0
枯水年	横山	84	90	100	41	33	0	1 669	1 409	0
	溪口	100	100	100	0	0	0	0	0	0
	潮安	97	99	100	14	3	0	540	43	0
特枯年	横山	60	68	100	56	50	0	4 206	3 818	0
	溪口	96	100	100	32	0	0	254	0	0
	潮安	86	97	100	42	25	0	2 413	128	0

注:与两种调度方案相比,天然径流方案的区别仅在于不考虑水库调蓄作用。

---- 目标流量 ——— 天然流量 ——— 常规调度 ——— 优化调度

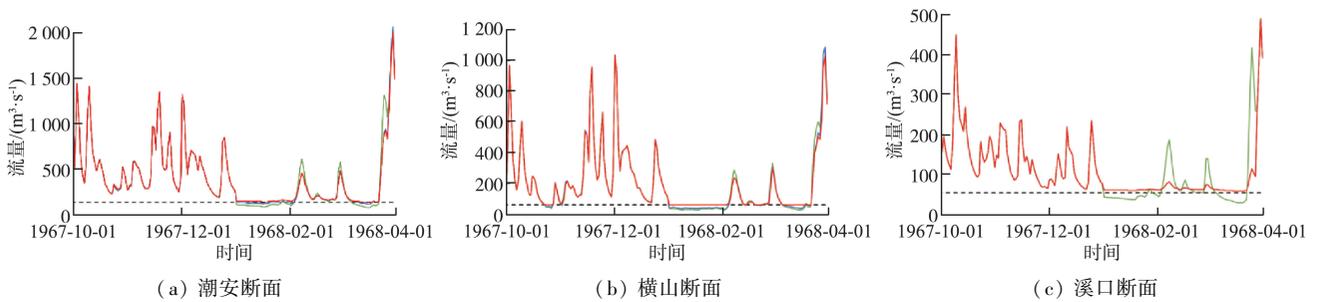


图 6 特枯年控制断面流量过程

Fig. 6 The flow process at control sections in the typical extreme dry years

障横山断面生态流量的同时也满足潮安断面生态流量需求。表 4 为不同典型年来水条件下益塘、合水、长潭 3 座大型水库在调度期的补偿水量。表 5 为益塘、合水、长潭水库在枯水期优化调度过程中的最低消落库容,结果显示 3 座大型水库在调度期内均未出现最低库容消落至死库容的情况;在平水年、偏枯年和枯水年来水条件下,3 座大型水库枯水期最低消落库容较为接近,且在最低消落库容时仍有较为充足的有效蓄水量;但在特枯年来水条件下,3 座大型水库最低消落库容有较大幅度的下降,且长潭水库最低消落库容接近死库容,存在一定的供水风险。

表 4 水库群优化调度补水量 单位:万 m<sup>3</sup>

Table 4 The amount of supplied water under reservoir optimal operations unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

水库	平水年	偏枯年	枯水年	特枯年
益塘	128.8	1 003.8	969.2	2 858.5
合水	44.8	346.7	373.9	1 103.9
长潭	52.4	411.8	393.6	1 179.1
合计	226.1	1 762.3	1 736.6	5 141.6

表 5 枯水期水库最低消落库容 单位:万 m<sup>3</sup>

Table 5 Minimum reservoir capacity during dry season unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

水库	平水年	偏枯年	枯水年	特枯年	死库容
益塘	11 399	10 672	10 627	2 485	900
合水	4 636	4 431	4 636	2 016	968
长潭	10 268	10 123	9 944	6 118	6 000

### 4.3 讨论

韩江流域是诸多水生生物的繁衍栖息地,其中包括国家 I 级重点保护物种鳗和国家 II 级重点保护物种花鳗鲡自然保护区,该自然保护区位于潮州市境内潮州水利枢纽库区上游干流河段和区间支流,主要风险来源于潮州水利枢纽蓄水对库区浅滩的淹没风险和上游高陂水利枢纽调度运行对水文情势的影响。保护区分布于潮州水利枢纽坝址上游 14 ~ 36 km 处,高程 14 ~ 22 m。根据 2011—2019 年潮州水利枢纽调度运行数据,库区最高运行水位 10.7 m,

低于保护区最低高程。另一方面,相关研究<sup>[29]</sup>表明,保护区上游高陂水利枢纽为径流式电站(库容系数仅 0.42%),仅在 11 月蓄水初期会引起保护区短时期内水位下降,一般情况下的调度运行对下游水文情势没有显著影响。此外,由于现阶段较少观察到鳗、花鳗鲡活动痕迹,缺少相关研究,难以量化物种对生态流量的要求,因此,本文生态调度主要以保障河道生态基流为主,目的是通过明确水资源开发利用底线,保护河流基本生态需水。

### 5 结语

本文通过  $Q_p$ 法和 Tennant 法等水文学方法开展了韩江流域生态流量计算,确定了横山、溪口、潮安断面的生态流量保障目标;在综合考虑流域水系结构、控制断面和水库工程分布位置基础上,基于图论中的图模型概念,采用节点和有向线段构建了韩江流域河网图模型,以区间来水、河道外取水、引调水等作为边界条件,耦合流域水库群调度功能和各节点水量平衡关系,实现全流域水量的传递转化过程模拟;基于水库天然来水和水库水量调蓄能力,分析确定了水库最小生态下泄流量目标,提出了耦合最小生态下泄流量要求的水库常规调度规则;针对流域河网图模型,借鉴大系统聚合-分解思想,提出了保障生态流量目标的迭代优化求解方法;以生态流量保证率最大为目标,耦合最大破坏深度约束,构建优化目标函数,根据常规调度情景下断面生态流量破坏情况和水库蓄水量情况,进行了流域水库群优化调度。研究表明,韩江流域各水库基于耦合最小生态下泄流量要求的常规调度规则进行独立调度运行,可基本保障控制断面生态流量需求;生态流量保障的重点在梅江横山断面,横山断面在不同来水条件下均可能存在生态流量不达标现象。在不同来水条件下,通过水库群联合优化调度,韩江流域水库群具备保障下游控制断面生态流量目标的潜力,但在特枯年来水条件下部分水库枯水期最低消落库

容接近死水位,存在一定的供水风险。研究结果验证了本文提出的面向生态流量保障的建模和求解方法具备较好的可行性和实用性。

## 参考文献:

- [1] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 1-11. (XU Zongxue, WU Wei, YU Songyan. Ecological baseflow: progress and challenge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 1-11. (in Chinese))
- [2] BHADURI A, BOGARDI J, SIDDIQIA, et al. Achieving sustainable development goals from a water perspective [J]. Frontiers in Environmental Science, 2016, 4: 00064.
- [3] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(6): 401-411. (CHEN Ang, SUI Xin, LIAO Wengen, et al. Review study on instream ecological base flow in China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(6): 401-411. (in Chinese))
- [4] 陆海明, 丰华丽, 邹鹰. 美国萨凡纳河生态流量管理实践案例研究[J]. 中国水利, 2019(5): 25-29. (LU Haiming, FENG Huali, ZOU Ying. Case study for E-flow management practices of the Savannah River in USA[J]. China Water Resources, 2019(5): 25-29. (in Chinese))
- [5] 华祖林, 董越洋, 褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 140-144. (in Chinese))
- [6] 李扬, 孙翀, 刘涵希. 福建省域河流生态流量监管与控制目标核定[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 92-96. (LI Yang, SUN Chong, LIU Hanxi. Supervision of river ecological flow and verification of control objectives in Fujian Province[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 92-96. (in Chinese))
- [7] 王建平, 李发鹏, 孙嘉. 我国生态流量管理实践探索[J]. 人民黄河, 2018, 40(11): 78-81. (WANG Jianping, LI Fapeng, SUN Jia. Practical exploration of the environmental flows management in China [J]. Yellow River, 2018, 40(11): 78-81. (in Chinese))
- [8] 陈晖, 刘达, 雷洪成, 等. 广东省生态流量确定与管控浅议[J]. 广东水利水电, 2020(11): 21-24. (CHEN Hui, LIU Da, LEI Hongcheng, et al. Preliminary discussion on the determination and control of environmental flow in Guangdong province[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2020(11): 21-24. (in Chinese))
- [9] RICHTER B D, MATHEWS R, HARRISON D L, et al. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity[J]. Ecological Applications, 2003, 13(1): 206-224.
- [10] 卢有麟, 周建中, 王浩, 等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 780-788. (LU Youlin, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 780-788. (in Chinese))
- [11] 陈晓宏, 钟睿达. 气候变化对澜沧江下游梯级电站发电及生态调度的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 754-764. (CHEN Xiaohong, ZHONG Ruida. Hydropower generation and ecological operation under climate change: a case study of the downstream cascade of Lancang River hydropower plants [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 754-764. (in Chinese))
- [12] 黄志鸿, 董增川, 周涛, 等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 202-208. (in Chinese))
- [13] 高玉琴, 周桐, 马真臻, 等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 60-67. (in Chinese))
- [14] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [15] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. (in Chinese))
- [16] 赵进勇, 董哲仁, 杨晓敏, 等. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(5): 1-6. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, YANG Xiaomin, et al. Connectivity evaluation technology for plain river network regions based on edge connectivity from graph theory [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(5): 1-6. (in Chinese))
- [17] 窦明, 石亚欣, 于璐, 等. 基于图论的城市河网水系连通方案优选: 以清溪河许昌段为例[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 664-674. (DOU Ming, SHI Yaxin, YU Lu, et al. Optimization of connecting schemes for urban river networks based on graph theory: a case study of Xuchang section of Qingxi River [J]. Journal of Hydraulic

- Engineering,2020,51(6):664-674. (in Chinese))
- [18] 赵璧奎. 城市原水系统水质水量联合调度优化方法及应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [19] 张晓祥,葛星,黄诚,等. 基于图论的抚河流域水资源多目标空间优化配置研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(2):21-29. (ZHANG Xiaoxiang, GE Xing, HUANG Cheng, et al. Graph theory-based study on multi-objective spatial optimal allocation of water resources in Fuhe River Watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(2): 21-29. (in Chinese))
- [20] 李泽君,黄本胜,邱静,等. 变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J]. 水资源保护,2021,37(5):22-29. (LI Zejun, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):22-29. (in Chinese))
- [21] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications,2003,19(5/6):397-441.
- [22] 陈星,许伟,李昆朋,等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价:以常熟市燕泾圩为例[J]. 水资源保护,2016,32(2):26-29. (CHEN Xing, XU Wei, LI Kunpeng, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 26-29. (in Chinese))
- [23] 金鑫. 面向河流生态健康的供水水库群联合调度研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
- [24] 孔波,付少杰,黄强. 大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J]. 水资源保护,2020,36(6):67-72. (KONG Bo, FU Shaojie, HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):67-72. (in Chinese))
- [25] ZHANG J W, WANG X, LIU P, et al. Assessing the weighted multi-objective adaptive surrogate model optimization to derive large-scale reservoir operating rules with sensitivity analysis [J]. Journal of Hydrology,2017,544:613-627.
- [26] ZHANG J W, LI Z J, WANG X, et al. A novel method for deriving reservoir operating rules based on flood classification-aggregation-decomposition [J]. Journal of Hydrology,2019,568:722-734.
- [27] 陈志刚,程琳,陈宇顺. 水库生态调度现状与展望[J]. 人民长江,2020,51(1):94-103. (CHEN Zhigang, CHENG Lin, CHEN Yushun. Current status and future perspectives of reservoirs ecological operation [J]. Yangtze River,2020,51(1):94-103. (in Chinese))
- [28] 马乐军,张行南,陈凯麒,等. 水利水电工程最小下泄生态基流量计算方法研析[J]. 环境影响评价,2017,39(6):1-5. (MA Lejun, ZHANG Xingnan, CHEN Kaiqi, et al. Study on the calculation method of ecological base flow for minimum discharge in water resource projects [J]. Environmental Impact Assessment,2017,39(6):1-5. (in Chinese))
- [29] 邝臣坤. 高陂水利枢纽工程对鳊的主要影响及其保护措施探讨[J]. 环境与发展,2018,30(4):197-199. (KUANG Chenkun. The main effects of Gaobei Water Control Project on Pelochelys bibroni and its protection measures [J]. Environment and Development, 2018, 30(4):197-199. (in Chinese))

(收稿日期:2021-06-26 编辑:熊水斌)

## 《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933,CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊,针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题,探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题,主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985年创刊,经过30多年的努力,《水资源保护》办刊成绩斐然,目前是美国《工程索引》(EI)收录期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊、华东地区优秀期刊,同时被荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、波兰《哥白尼索引》(IC)等数据库收录。

《水资源保护》长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊,是国内较有影响的水利期刊之一,主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊,30元/册,全年共计180元,每逢单月20日出版。邮发代号:28-298。

地址:210098 南京市西康路1号

电话:(025)83786642

电子邮箱:bh1985@vip.163.com;bh@hhu.edu.cn